

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

高性能繊維補強モルタルを適用した鉄筋
コンクリート部材の引張特性に関する研究

A Study on Tensile Properties of Reinforced Members
using High Performance Fiber Reinforced Mortar

申 請 者

塩 永	亮 介
Ryosuke	SHIONAGA

--

2018 年 12 月

コンクリートやモルタル中に鋼繊維や合成繊維を混入する繊維補強セメント系複合材（FRCC）は、ひび割れ後もそのひび割れ面で繊維が引張力を伝達することで、セメント系材料の弱点である引張抵抗力を大きく改善できる材料である。FRCCの中でも代表的な鋼繊維補強コンクリート（SFRC）は、国内でも1970年代から研究開発が行われ、それらの成果を踏まえて1983年に設計規準が整備された。しかし、当時の許容応力度設計法では耐力照査が主であり、使用状態におけるひび割れ幅の照査やピーク後の靱性能を反映できる設計体系ではなく、繊維の混入はあくまでひび割れ抑制の一対策にすぎなかった。

2000年代に入り、設計体系が仕様規定型から性能規定型に移行する中で、構造設計の自由度が増し、高性能な特性を持つ材料を適用しやすくなった。そのような中、圧縮強度 150N/mm^2 を超える高強度モルタルに鋼繊維を高い混入率で使用する超高強度繊維補強コンクリート（UFC）が海外より技術導入され、国内では2004年に基準化された。超高強度な性能を活かして断面の縮小化や部材の軽量化が見込まれる一方で、UFCはひび割れを許さないフルプレストレス構造への適用に限定されている。この場合、高い混入率で使用した鋼繊維の効果は、せん断耐力の付加分のみの貢献であり、本来FRCCの目的であった引張抵抗力の改善にはいかされていない。この理由には、過大な自己収縮ひずみや熱養生の必要性といった製造上の問題のほか、このような高性能FRCCをRC構造に適用した場合の力の伝達機構やひび割れ抑制の効果について、十分解明されていないことが挙げられる。

そこで本研究では、高性能FRCCをRC構造に適用した場合の力学的特性を解明することを目的とした。ここで着目するのは引張に対する力学的性能であり、特にFRCC材料単体が持つ引張特性（引張軟化特性）が、鉄筋と併用したRC部材の引張特性（テンションスティフニングやひび割れ性状）に及ぼす影響について実験的アプローチおよび解析的アプローチにより明らかにしていく。検討するパラメータは、高性能FRCCに用いる鋼繊維の混入率や種類（アスペクト比）のほか、製造方法や打設方法に起因する鋼繊維の配向性にも着目し、これらのパラメータが鉄筋を有するHPFRM部材の引張特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

第2章では、本研究で扱う高性能FRCCの配合開発について説明する。UFCを代表とする超高性能FRCCでは、その高い製造コストが社会的普及の妨げとなる懸念があることから、本研究では通常のコンクリートと同様の混練設備および養生方法で製造できることを前提に、優れた引張靱性を発揮できる材料として、高性能繊維補強モルタル（HPFRM）を開発した。HPFRMは、高強度・高靱性・高流動を合わせ持ち、圧縮強度が $100\sim 130\text{N/mm}^2$ 、引張靱性能を示す破壊エネ

ルギーが $10 \sim 20 \text{ N/mm}$ ，フレッシュ時には自己充填性を有する材料である．本材料は，開発当初は欧州規格（EN）に適合する材料を用いて配合開発を行ったが，国内規格（JIS）に適合する材料で同性能を発揮するための配合改良も実施した．ここで鋼繊維は統一し，基本的には繊維長 13 mm ，繊維径 0.16 mm のストレート形状の鋼繊維を最大混入率 $1.6 \text{ vol.}\%$ で用いることとした．また配合改良では，自己収縮ひずみの抑制に向けた検討も行った．水結合材比が 20% 近くなる高強度モルタルでは，材齢初期に $500 \sim 1000 \mu$ 近い自己収縮ひずみが発生し，鉄筋と併用する構造部材に適用した場合に初期ひび割れが発生する懸念があった．この自己収縮抑制対策として早強型膨張材を混和するとし，混和量の違いが自己収縮ひずみや膨張ひずみに与える影響を把握した．

第 3 章では，HPFRM の力学性能を最も特徴づける引張軟化曲線（引張応力－ひび割れ幅関係）のモデル化を行った．実験精度の観点から，切欠きはりの曲げ試験結果の逆解析から得る引張軟化曲線ではなく，直接引張試験によって限界ひび割れ幅までの軟化挙動を厳密に取得することを試みた．この実験では鋼繊維の混入率の違い（ 0 ， 0.8 ， $1.6 \text{ vol.}\%$ ）が，ひび割れ発生強度，最大引張強度，限界ひび割れ幅に与える影響を把握した上で，Hoordijk 式をベースとした HPFRM の引張軟化曲線モデルを構築した．また，鋼繊維が同混入率であっても，内部の鋼繊維の配向の違いによって引張軟化特性が大きく変化した．そこで HPFRM 内の鋼繊維をできるだけ一方向に配向させ，そこから 0° ， 45° ， 90° に切り出した試験片を用いた直接引張試験を実施した．その結果，想定していた通り荷重軸に直交する不利な配向では，試験体の最大引張強度は低下し，破壊エネルギーも減少した．この試験結果から，提案した HPFRM の引張軟化曲線モデルに対して，鋼繊維の配向性の違いも考慮できる推定式も構築した．

第 4 章では，鉄筋を有する HPFRM 部材のテンションスティフニングやひび割れ性状を把握するため，異形鉄筋を中心に埋め込んだ HPFRM 試験体の一軸引張試験（両引き試験）を実施した．試験パラメータは，鋼繊維の混入率と種類（アスペクト比），さらに試験体の打込み方向に影響される繊維の配向性とした．両引き試験の結果，鋼繊維混入率の増加に伴い，部材のひび割れ発生荷重および降伏荷重が増加するとともに，ひび割れ間隔が減少し，その結果として平均ひび割れ幅も減少した．しかしながら鋼繊維が同混入率であっても繊維配向が不利な条件では，部材のひび割れ発生荷重や降伏荷重が低下し，HPFRM の平均応力で $0.8 \sim 15\%$ の低下，平均ひび割れ幅で約 20% の増加となった．

また両引き試験と同時に，鉄筋を有する HPFRM 版供試体の曲げ試験も実施し，曲げモーメント下における曲げ剛性やひび割れ性状も検討した．部材の曲げ耐力やひび割れ分散性に与える影響は，両引き試験での傾向と同様であった．またこの版曲げ試験では，試験体の鉄筋比（ 1.57% と 3.14% ）と鋼繊維混入率（ 0 ， 0.8 ，

1.6vol.%) を変えることで、それらの組合せが曲げ剛性や曲げ耐力に与える効果を把握することができた。

第 5 章では、HPFRM の平均応力－平均ひずみ関係（テンションスティフニング）のモデル化を目的とした。このモデル化は重要な意義をもつ。なぜなら適切なテンションスティフニングが把握できれば、それを非線形有限要素解析に導入することで、HPFRM を適用した各種 RC 部材の構造性能を正しく評価できるからである。そこで、コンクリート特有のひび割れ進展の現象を直接的に解析で扱うことができる剛体バネモデル（RBSM）によって、両引き試験のシミュレーションを行った。この RBSM では、HPFRM の引張構成則に第 3 章で構築した HPFRM の引張軟化曲線モデルを導入することで、両引き試験で得た部材挙動（荷重－変位関係やひび割れ性状）の再現を可能とした。また、RBSM によって異形鉄筋平均応力－平均ひずみ関係も正確に抽出できたことから、あらためて HPFRM のテンションスティフニングのモデル化を図った。結果として、Collins & Mitchell らの提案式を改良するかたちで、鋼繊維の配向性を考慮できるテンションスティフニングのモデルを構築した。このモデルを非線形 FEM 解析における引張側の材料構成則に導入して解析したところ、両引き試験や版曲げ試験など HPFRM を適用した RC 部材の変形挙動を精度よく再現することができた。

第 6 章では、HPFRM を適用した RC 部材のひび割れ幅算定式の構築を行った。両引き試験から得られたひび割れ間隔の情報、またテンションスティフニングから得られた HPFRM の平均応力の情報をもとに、鋼繊維の諸条件が考慮できる係数（ k_f , k_c ）を導入する平均ひび割れ間隔の算定式および鉄筋の平均ひずみ算定式を構築した。そして両者から求まる平均ひび割れ幅の算定値は、両引き試験で得られた荷重の増加に伴う平均ひび割れ幅の推移を精度よく再現できることを確認した。

以上より、本研究の成果を総括する。本研究では、汎用的な RC 構造に適用しやすくかつ構造合理化が期待できる材料として、高性能繊維補強モルタル（HPFRM）を開発した。さらに、HPFRM の大きな力学性能である引張軟化曲線を把握し、そのモデル化を行った。さらに鉄筋を有する HPFRM 部材の両引き試験から、HPFRM の適用が RC 部材の変形やひび割れ幅を大きく低減することを把握した。その効果は、RBSM によるシミュレーションからも明らかとなり、非線形 FEM 解析に活用できる HPFRM のテンションスティフニングモデルも構築した。また RC 部材の平均ひび割れ幅に対して、既往のひび割れ幅式をベースに鋼繊維の配向性を考慮できる修正式を構築した。これらの成果が、今後、HPFRM の構造利用の拡大へ寄与できるものと考ええる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 塩永 亮介 印

(2019年 1月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, 圧縮強度 100 N/mm ² 程度の高性能繊維補強モルタルにおける初期ひずみ挙動および引張軟化特性, コンクリート工学論文集 第 27 巻, pp.33-42, 2016.5
○論文	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, J. C. Walraven, 高性能繊維補強モルタルを適用した RC 部材の一軸引張挙動に関する研究, 土木学会論文集 E Vol.66 No.4, pp.366-379, 2010.10
○論文	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, 高性能繊維補強モルタルのテンションスティフニングのモデル化, 構造工学論文集 Vol. 56A, pp.938-946, 2010.3
○論文	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, J. C. Walraven, 鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集 Vol.30, No.1, pp.309-314, 2008.7
○論文	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, J. C. Walraven, 鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の引張挙動, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.1459-1464, 2007.7
論文	W. Pansuk, 佐藤 靖彦, 上田 多門, 塩永 亮介, Shear capacity of Ultra-high performance fiber reinforced concrete beam, コンクリート工学年次論文集 Vol.28, No.2, pp.1405-1410, 2006.7
2. 講演	
講演	R. Shionaga, W. Pansuk, S. Grünwald, J.A. den Uijl, J.C. Walraven, Optimization of Tensile Strain-Hardening Cementitious Composites for Tensile Strain Capacity, 3rd International RILEM conference on Strain Hardening Cementitious Composites(SHCC3), pp.79-86, 2014.11
講演	Y. Sato, R. Shionaga, Y. Nakamura, Y. Nakajima, Experimental and Analytical Investigation on Failure Behavior of Steel Plate –UHPFRC Composite Beams-, 2 nd International Symposium on Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC2013), pp.99-106, 2013.10
○講演	塩永 亮介, 佐藤 靖彦, J. C. Walraven, 高性能繊維補強モルタル部材のひび割れ分散効果と新しい適用法, JCI セメント系繊維補強セメント系複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.369-376, 2012.9
講演	塩永 亮介, 中村 善彦, 中島 裕, 佐藤 靖彦, 高性能繊維補強モルタルを適用した鋼床版補強構造の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会(V-214), pp.427-428, 2012.9

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○講演	<u>R. Shionaga</u> , Y. Sato , J. C. Walraven, Numerical Simulation of the Behaviour of High Performance Fibre Reinforced Mortar with Conventional Reinforcing Bars in Concentric Tension, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure(SLDI), pp.783-790, 2010.10
○講演	<u>R. Shionaga</u> , J. C. Walraven, J. A. den Uij, Y. Sato, Cracking Behavior of High Performance Fiber Reinforced Mortar in Tension and Bending, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, pp.1053-1060, 2008.11
講演	山崎 大輔, W. Pansuk, 佐藤 靖彦, <u>塩永 亮介</u> , 繊維の配向性が自己充填型鋼繊維補強モルタルの引張軟化特性に及ぼす影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会(V-261), pp.521-522, 2008.9,
講演	D. Yamazaki, Y. Sato, W. Pansuk, <u>R. Shionaga</u> , Influences of Fiber Orientation on Tensile Behavior of Self-Compacting Fiber Reinforced Mortar, The 3rd ACF International Conference(ACF/VCA 2008), pp.507-513, 2008.11
○講演	<u>R. Shionaga</u> , J. C. Walraven, J. A. den Uij, Y. Sato , Tension Stiffening of High Performance Fiber Reinforced Concrete, fib Symposium 2007 (Dubrovnik), pp.259-266, 2007.5
○講演	<u>R. Shionaga</u> , J. C. Walraven, J. A. den Uij, Y. Sato , Combined Effect of Steel Fibers and Reinforcing Bars in High Performance Fiber Reinforced Concrete, 16th International Conference on Building Materials (ibausil 2006/Weimar), 2006.9
○講演	<u>R. Shionaga</u> , J. C. Walraven, J. A. den Uij, Y. Sato , Structural Behavior of High Performance Fiber Reinforced Concrete in Tension and Bending, 6th International PhD Symposium in Civil Engineering (Zurich), 2006.8
3. その他	
著書	<u>塩永 亮介</u> , 戸田 勝哉, 伊藤 祐二, 高橋 晴香, SEC 工法によるコンクリートの性能改善と微細構造の分析, コンクリート工学 テクニカルレポート, Vol.53 No.10, pp.874-881, 2015.10
論文	<u>塩永 亮介</u> , 戸田 勝哉, 伊藤 祐二, 高橋 晴香, 分割練混ぜによるセメント水和率および遷移帯厚さの評価とコンクリート緻密性に与える影響, コンクリート工学 Vol.37 No.1, pp.541-546, 2015.7
講演	<u>塩永 亮介</u> , 今村 紅音, 戸田 勝哉, 大友 鉄平, 藤井 弘, 遮光性養生マットがコンクリート表層の温度・湿度および品質に及ぼす影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会 (V-384), pp.767-768, 2014.9

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	塩永 亮介, 野瀬 裕之, 伊藤 祐二, 加藤 裕章, 橋本 博英, 佐藤 聡 DT 中性子を用いた高濃度ホウ素含有コンクリートの遮蔽実験（1）高濃度ホウ素含有コンクリートの開発, 日本原子力学会「2014 年秋の大会」, pp.601, 2014.9
論文	塩永 亮介, 戸田 勝哉, 伊藤 祐二, 高橋 晴香, 練混ぜ工法を変えたコンクリートの微細構造の分析と評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.610-615, 2014.7
講演	塩永 亮介, 山口 隆一, 鈴木 統, 鋼コンクリート合成床版の底鋼板継手部の耐荷挙動, 土木学会第 66 回年次学術講演会(I-022), pp.43-44, 2011.9
講演	塩永 亮介, 今村 紅音, 鉄筋を有する高強度繊維補強コンクリート部材の両引き試験, 土木学会第 65 回年次学術講演会(V-527), pp.1053-1054, 2010.9
講演	塩永 亮介, 山口 隆一, 今村 紅音, 上田 和哉, 仲村 篤, 都市高速における高強度繊維補強コンクリートのポンプ施工, 土木学会第 64 回年次学術講演会(V-320), pp.637-638, 2009.9
講演	増田 紅音, 塩永 亮介, 山口 隆一, 高強度繊維補強コンクリートの引張軟化特性, 土木学会第 63 回年次学術講演会(V258), pp.515-516, 2008.9
講演	塩永 亮介, 西土 隆幸, 安 雪暉, 鉄筋の腐食が RC 部材の引張挙動に与える影響, 土木学会第 62 回年次学術講演会(V-521), 2007.9
講演	塩永 亮介, 師山 裕, 倉田 幸宏, 高瀬 和男, コンクリート初期特性を考慮した床版の温度応力解析に関する一考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会(CS8-035), 2004.9
論文	塩永 亮介, 川辺 篤宣, 山田 菊雄, 杉本 憲生, 鋼ポータルラーメン橋隅角部の静的載荷試験と解析評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.2, 2004.7
講演	塩永 亮介, 倉田 幸宏, 嶽下 裕一, 室田 敬, 津田 久嗣, 場所打ち PC 床版施工時の温度応力に関するパラメータ解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会(CS), 2003.9
講演	塩永 亮介, 戸田 均, 安川 義行, 藪野 真史, 稲葉 尚文, 場所打ち PC 床版 2 主桁橋の床版コンクリート初期ひずみ特性－佐分利川橋－, 土木学会第 57 回年次学術講演会(CS), 2002.9
講演	塩永 亮介, 河野 豊, 鈴木 統, 阿部 英彦, 合成床版橋軸方向継ぎ手部の静的載荷試験, 土木学会第 56 回年次学術講演会(CS), 2001.9